

# **temas ta**ctuales **h**de la **s**idrología ubterránea

Nilda González, Eduardo E. Kruse,  
María Marta Trovatto y Patricia Laurencena  
(Editores)

2013



# TEMAS ACTUALES DE LA HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA 2013

Nilda González, Eduardo E. Kruse, María Marta Trovatto  
y Patricia Laurencena  
(Editores)

Los editores agradecen la valiosa participación y apoyo a su cometido  
de la Dra. María del Pilar Álvarez

Habiendo contado los autores con un template para la confección de los trabajos,  
no se responsabilizan de los defectos que pudiesen derivar de su uso incorrecto.



Temas actuales en hidrología subterránea 2013 / Nilda González ... [et.al] ; edición literaria a cargo de Nilda González ...[et.al. ]. - 1a ed. - La Plata : EDULP, 2013. 450 p. ; 21x15 cm.

ISBN 978-987-1985-03-6

1. Hidrología Subterránea. I. González, Nilda II. González, Nilda, ed. lit.  
CDD 551.49

Fecha de catalogación: 06/09/2013

## TEMAS ACTUALES DE LA HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA 2013



**Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (Edulp)**

47 N.º 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina

+54 221 427 3992 / 427 4898

editorial@editorial.unlp.edu.ar

www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias (REUN)

Primera edición, 2013

Queda hecho el depósito que marca la Ley 11.723

©2013 - Edulp

Impreso en Argentina

# La hidrogeología en la evaluación minera de salmueras de interés económico

**Mario A. Hernández, Isidoro B. Schalamuk y Nilda González**

Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP) Av. 60 y 122 La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina.

Mail de contacto: [mario\\_h@sinectis.com.ar](mailto:mario_h@sinectis.com.ar)

---

## RESUMEN

El impulso del aprovechamiento de salmueras de interés económico abrió una nueva perspectiva de la hidrogeología, como lo demuestran los yacimientos de Atacama y Maricunga (Chile), Salar del Hombre Muerto (Argentina), Tajainar, Sambuye (China), Clayton Valley, Great Salt Lake (USA) con salmueras de Litio y Potasio. En Argentina son importantes las de Olaroz, del Rincón, Antofalla (Puna) y Huyamampa. A diferencia de la minería clásica, la evaluación tiene características específicas, basadas en hidrogeología (hidrodinámica e hidroquímica). Según la experiencia de los autores, se expone una síntesis metodológica para factibilidad económica, a partir del reconocimiento del sistema geohidrológico, diferenciando sectores de recarga, circulación y descarga, dirección del flujo subterráneo, velocidad efectiva, características hidroquímicas, evolución de concentraciones de solutos de interés y poder calcular "reservas" según ley económicamente factible. A diferencia de la minería convencional, los factores tiempo y distancias de recorrido poseen mucho peso en las decisiones. Son abarcados aspectos que hacen a prospección, evaluación, modelización y propuestas de aprovechamiento.

Palabras clave: Salmueras – minería – evaluación - hidrogeología

---

## ABSTRACT

The increasing exploitation of brines with commercial value opened new prospects for hydrogeology, as exemplified by the lithium and potassium brine fields of Atacama and Maricunga (Chile), Salar del Hombre Muerto (Argentina), Tajainar, Sambuye (China), Clayton Valley, Great Salt Lake (USA). Other important fields in Argentina are Olaroz, del Rincón, Antofalla and Huyamampa. Unlike classical mining, the assessment has specific characteristics based on hydrogeology (hydrodynamics and hydrochemistry). In order to calculate the "reserves" according to an economically feasible grade, a brief methodology on the economic feasibility is developed, which is based on the authors' experience. It involves a reconnaissance of the geohydrologic system, differentiating recharge, circulation and discharge areas, direction of underground flow, effective velocity, hydrochemical characteristics, and evolution of solute concentration. Unlike conventional mining, the time and distance factors have much weight in the decisions. Aspects related to prospecting, assessment, modelling and utilization proposals are included.

Key words: Brine – mining – evaluation – hydrogeology

---

## Introducción

El aprovechamiento de las salmueras con solutos de considerable interés económico, ha cobrado singular impulso a nivel internacional y en particular en nuestro país en los últimos años.

Se destacan en el mundo los importantes salares de Atacama y Maricunga, en Chile (casi 40% de la producción mundial de Litio), Salar del Hombre Muerto en Catamarca, Argentina (poco menos del 10%), salares de Tajainar, Sambuye y otros en China, Tibet y Rusia, Clayton Valley y Great Salt Lake en USA, que ofrecen significativos aportes de Litio y recientemente también Potasio.

En Argentina son varios los yacimientos que pronto ingresarán a la producción a partir de salmueras, entre otros los importantes de Olaroz, del Rincón y Antofalla, en la Puna argentina, región tomada como ejemplo para este trabajo.

En Bolivia, el extenso salar de Uyuni y el de Copiara son actualmente evaluados para recuperar Litio desde salmueras. En nuestro país, históricamente el Salar de Huyamampa en Santiago del Estero (Schalamuk et al., 2005), fue uno de los primeros que recuperó y procesó salmueras ricas en sulfato de Sodio, con modesta producción durante casi 30 años.

Actualmente se llevan a cabo estudios de factibilidad a partir de acuíferos salinos.

A diferencia de la minería clásica, la evaluación de estas soluciones conlleva toda una minería específica, cuya base es esencialmente hidrogeológica.

Una de las diferencias más notables, además del estado líquido de la mena, es que se trata de reservas variables en el tiempo, tanto en volumen como en la ley (McCord et al., 2011).

Se ofrece un panorama de las perspectivas económicas de esta actividad en Argentina, con énfasis en la región de la Puna (Figura 1), junto con una metodología comparada con la de menas sólidas para la prospección y evaluación de estos yacimientos.



**Figura 1.** Área de interés en la Puna

### Exploración-explotación de salmueras en la Puna.

La región de la Puna es un vasto altiplano que contiene el 83% de las salmueras litíferas del planeta, otro 15 % se encuentra en las del Tibet y sólo 2 % en Nevada (USA). Vinculadas a amplios salares o cuencas salinas, son también enormes fuentes potásicas, de Boro, Magnesio, además de sulfatos, carbonatos y cloruros de Sodio, entre otras sales de interés económico.

Tradicionalmente se caracterizó por su producción de boratos, especialmente en Argentina, provenientes tanto de costras salinas como de amplias acumulaciones

sedimentarias terciarias portadoras de diferentes especies de Boro.

En los últimos años dado el gran interés del Litio debido a su creciente uso en diversas tecnologías, especialmente elaboración de baterías, construcción de automóviles híbridos y generación de energía nuclear, se ha iniciado el estudio y exploración de detalle con objeto de producir el valioso metal a partir de salmueras, dadas a conocer por Nicolli (1980).

Su importancia económica se incrementa por altos contenidos en Potasio, elemento esencial en la elaboración de fertilizantes.

Los salares del altiplano vienen siendo objeto de explotación desde mediados del siglo XIX. En 1997 se inicia el aprovechamiento del Salar del Hombre Muerto (Catamarca) con producción anual de carbonato y cloruro de Litio del orden de 8.000 y 3.000 toneladas, respectivamente, sales que se originan en el tratamiento de las salmueras extraídas hasta 70 metros de profundidad (Nicolli et al., 1982) y procesadas en piletas de evaporación en el mismo yacimiento.

La unidad morfoestructural Puna se extiende en Argentina en una longitud del orden de los 600 km por un ancho próximo a los 200 km. Contiene numerosos cuerpos salinos portadores de halita, boratos, thenardita, mirabilita, carbonato de Sodio y soluciones ricas en Litio, Potasio, Magnesio, Boro y sulfatos, carbonatos y cloruros de Sodio.

El estilo estructural regional está dominado por grandes fallas inversas de orientación meridiana que determinan bloques elevados y graben con desplazamiento vertical de varios centenares de metros, además de otro juego de fallas regionales, de rumbo N30° E y N3°W.

Geológicamente, existen rocas del basamento ígneo-metamórfico, atribuido al Precámbrico-Paleozoico inferior. Afloran también lutitas y sedimentos areniscos del Ordovícico y materiales volcánicos del ciclo efusivo Terciario-Cuaternario, con dominio de dacitas, andesitas y menor proporción de basaltos, tobas e ignimbritas. También se hallan calcáreos travertínicos póstumos a la actividad volcánica.

Sedimentos terciarios continentales conforman la mayor parte del relleno de las cuencas tectónicas, representado por potentes conjuntos de elementos clásticos: conglomerados, areniscas, limolitas, bajo la denominación genérica de Terciario Indiferenciado (Méndez et. al., 1979).

El proceso de concentración por evaporación se halla favorecido por el clima árido de la región, con escasas precipitaciones

que ocurren en los meses de octubre a marzo, con un promedio inferior a los 300 mm anuales.

Los principales salares y lagunas emplazados en la región, cubren en su conjunto, una superficie del orden de los 4.000 km<sup>2</sup> destacándose por sus dimensiones la amplia fosa del Salar de Arizaro, con casi 1.600 km<sup>2</sup>, el Salar de Antofalla con unos 540 km<sup>2</sup>, Salar del Hombre Muerto 530 km<sup>2</sup>, Pocitos con 435 km<sup>2</sup> y Cauchari de aproximadamente 350 km<sup>2</sup>.

El ritmo del mercado mundial y el creciente valor económico de dichos metales estratégicos hacen presagiar un vigoroso desarrollo de la exploración avanzada y evaluación de reservas, para la puesta en producción de muchos de estos importantes yacimientos.

Es precisamente en aquellos aspectos atinentes a la prospección y evaluación, donde

la singular minería de salmueras se aparta metodológicamente de la geología clásica de yacimientos, en forma considerable, como lo apuntaron Schalamuk et al. (2005), a propósito del proyecto de explotación de soluciones subterráneas ricas en sulfato de Sodio ya mencionadas para Huyamampa.

Sobre dichas diferencias eminentemente conceptuales, donde como se verá prevalecen el factor tiempo y la variabilidad de las reservas, se ha construido la denominación de "nueva minería" para involucrar a la exploración y aprovechamiento de concentraciones subterráneas en solución acuosa, donde la disciplina hidrogeológica juega un rol esencial y sirve de base fundamental para el dimensionamiento de los emprendimientos mineros.

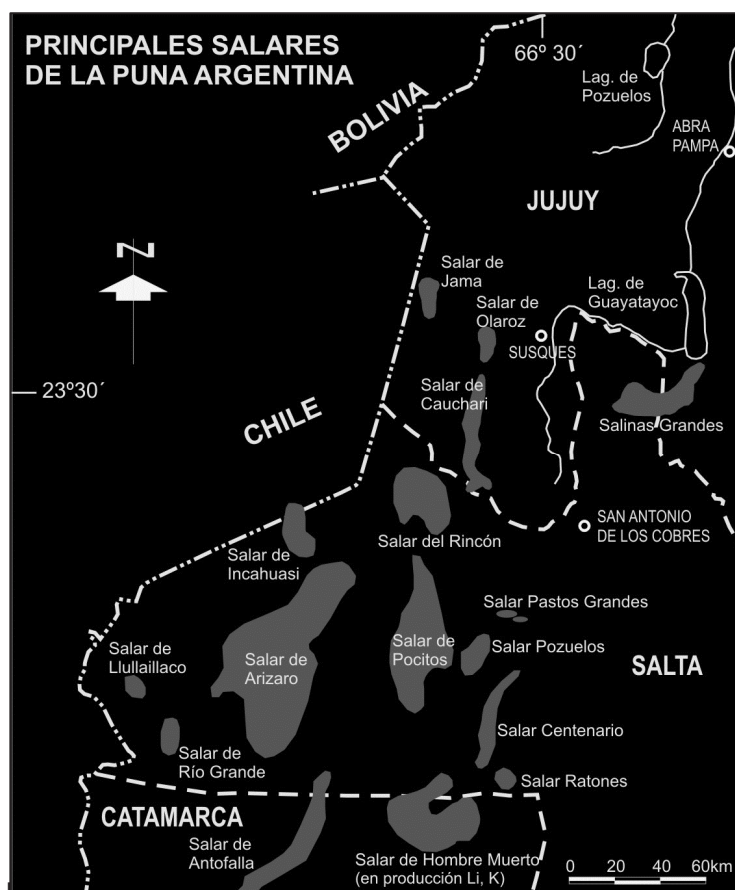


Figura 2. Salares en la Puna

## **La hidrogeología en la evaluación de yacimientos. Síntesis metodológica**

El agotamiento de muchos minerales, junto con el aumento en el precio de mercado, la mayor demanda internacional, los cambios tecnológicos en la producción minera y la creciente preocupación ambiental que rodea a esta actividad, han hecho que sean cada vez más frecuentes e importantes los proyectos basados en el aprovechamiento de salmueras.

También cabe mencionar el menor costo de producción del carbonato de Litio, en relación al obtenido a partir de minerales (Méndez, 2011).

No existe mayor tradición en el desarrollo de estos proyectos, por lo cual se manifiestan huecos conceptuales que pueden conspirar contra su concreción exitosa.

El primero de ellos es que en estos particulares yacimientos, la ley es variable en el tiempo, de acuerdo a la dinámica de la solución, a la presencia de sales solubilizables, cambios en el pH y potencial Redox, variaciones en el régimen del flujo subterráneo, relaciones con las aguas superficiales e interacciones dentro del propio sistema geohidrológico.

Si bien en la explotación de cuerpos con concentración superficial de sales, históricamente más conocida, se reconocen también cambios en la ley minera, existe en esos casos una importante influencia del clima (dilución por aportes pluviales/nivales o concentración por sequías, variaciones en la temperatura del aire, duración estacional de la insolación, inviernos con nieve), factor muy poco gravitante en las salmueras subterráneas, de mayor estabilidad térmica y composicional, por su distancia con los fenómenos exógenos.

En estrecha relación con este condicionante se halla la permanencia de los volúmenes extraíbles a cuantificar, ya que deben de estar de acuerdo tanto con la concentración económicamente rentable como con el tiempo de retorno de la inversión, ambas variables difíciles de conjugar en el caso de esta particular yacencia.

Entre los inconvenientes que más adelante se analizan, pueden citarse los emergentes de la anisotropía y heterogeneidad de los acuíferos, especialmente relevantes en la fase de modelación matemática (McCord et al., 2011).

Los pasos metodológicos a seguir cuando deban evaluarse soluciones salinas subterráneas proceden fundamentalmente, como ya se dijese, del campo de la hidrogeología e incluyen los puntos que a

continuación se exponen, a título de breve síntesis de una secuencia de tareas.

Reconocimiento de la geología superficial, geomorfología y conformación geológica y estructural del subsuelo, a escala regional.

Identificación de la componente física del sistema geohidrológico (unidades hidroestratigráficas y su distribución espacial).

Caracterización del área objeto a escala de mayor detalle, determinación de la litología y mineralogía del/los acuíferos de interés, con especial atención a aquellas especies minerales solubilizables, tratando de cuantificarlas en términos de abundancia.

Aproximación al balance hidrológico de la comarca, elaboración muy importante en el caso de acuíferos freáticos o semilibres someros.

Relevamiento de afloramientos de agua subterránea y eventuales obras de captación antecedentes. Construcción de una serie de perforaciones de exploración, muestreo y ensayo. Determinación expeditiva de propiedades físicas e iones de importancia para el proyecto.

Colección de muestras líquidas y de roca/sedimento para determinaciones específicas en laboratorio.

Medición de profundidad de nivel/es de agua subterránea, acotamiento topográfico de boca de pozo.

Construcción con las alturas hidrostáticas, función del punto anterior, de mapas equipotenciales y redes de flujo. Localización de zonas de recarga, circulación y descarga, dirección del escurrimiento subterráneo, relación del acuífero con las aguas superficiales.

Ejecución de ensayos hidráulicos (preferentemente pruebas de bombeo) para determinación de parámetros geohidrológicos fundamentales (coeficientes de permeabilidad, transmisividad, almacenamiento, eventualmente transmisividad vertical).

Establecimiento de una red de monitoreo multipropósito, sobre la base de los sondeos construidos.

Cuantificación de la dinámica subterránea: gradientes hídricos, velocidad efectiva del flujo, caudales de ingreso y egreso al sector bajo prospección.

Modelación numérica del flujo subterráneo: establecimiento de límites y condiciones de borde, dinámica del sistema y acciones exógenas a simular.

Estudio hidroquímico, sobre la base de los resultados analíticos. Relación espacial y temporal entre los contenidos de iones problema en la roca/sedimento y el agua subterránea, utilizando los indicadores provistos

por las determinaciones en muestras colectadas en la red de monitoreo.

Análisis de evolución química de las concentraciones salinas, influencia de la roca acuífera, del recorrido del agua, velocidad de flujo, variaciones naturales de las propiedades físicas y de las características hidrogeológicas (anisotropía y heterogeneidad).

Inserción de la dimensión hidroquímica en la modelación del flujo subterráneo ya ajustada, para poder materializar un seguimiento de la evolución salina y producir una actualización frecuente de la ley de la salmuera, en función de la dinámica del flujo.

Es conveniente basar la información producida durante la marcha del proyecto, incluyendo las elaboraciones realizadas y las sucesivas corridas del modelo, en un Sistema de Información Geográfica (GIS).

Puede lograrse de dicha manera disponer de tantas salidas gráficas (visuales o papel) como se desee, para la permanente actualización.

Por ejemplo, introduciendo la información provista por la red de monitoreo en el modelo en modalidad pronóstico, es posible transferir al GIS sus resultados para una visualización inmediata del estado de la explotación.

### **Enfoque conceptual de los proyectos**

De la síntesis de instancias metodológicas expuesta, puede advertirse que emergen ciertos aspectos conceptuales muy trascendentes que dominan la formulación de los Proyectos.

El marco geológico no importa únicamente desde el punto de vista composicional, como elemento halogénico, sino fundamentalmente por sus condiciones hidroestratigráficas. Interesa la distribución espacial de acuíferos, acuitardos, acucludos en términos de las anisotropías y/o heterogeneidades que condicionen el flujo subterráneo (McCord et al., 2011).

Debe tenerse en claro que se tratará de una evaluación de carácter dinámico a realizarse bajo régimen no-permanente, impuesto por la extracción, ya que la estática que se limita al cálculo de reservas deja fuera importantes circunstancias (Schalamuk et al., 2005).

Con respecto a este punto, es necesario enfatizar en la necesidad de obtener parámetros hidrodinámicos mediante ensayos (coeficientes de Permeabilidad, Trasmisividad, Trasmisividad vertical) además de los de almacenaje (coeficientes de almacenamiento y porosidad efectiva) que proponen Houston et al. (2011).

Al tratarse de una yacencia dinámica de la mena, es elemental que deba hacerse un monitoreo secuente del yacimiento por medio de la red precedentemente planteada, tanto para percibir las variaciones en la ley mineral como para notar los cambios que pudiese imponer la extracción.

Disponer de un modelo matemático lo mejor ajustado posible, con capacidad de pronóstico, va a permitir la simulación evolutiva de la explotación y en consecuencia, corregir posibles efectos no deseados y apoyar la toma de decisiones sobre el emprendimiento. Lógicamente, el uso de un GIS facilitará grandemente la visualización del estado real en cada momento y del simulado.

### **Perspectivas**

En Argentina, al igual que en el resto del mundo, ya no despiertan tanto interés las menas sólidas como las de espodumeno para la producción de Litio, en razón de las posibilidades que las soluciones del carbonato ofrecen en el ámbito de la Puna, principalmente las provincias de Catamarca, Jujuy y Salta.

Si bien a la fecha el consumo mundial del metal está cubierto por la oferta de 80000 ton en 2011 ([www.inversorenergetico.com/mayo](http://www.inversorenergetico.com/mayo) 2013), se espera desde el año 2016 un incremento del orden del 40% en la demanda, motorizada fuertemente por sus aplicaciones en aleaciones livianas y las nuevas industrias informática y automotriz.

En 2011, Chile aportó el 37% de la producción mundial, seguido por Australia con el 30%; China un 15% y Argentina, con un 12%.

Argentina, Bolivia y Chile conforman el denominado Triángulo ABC o Triángulo del Litio, dado que concentran aproximadamente el 60% de los recursos identificados.

Si se consideran sólo las salmueras (principal fuente), la participación del Triángulo del Litio en las reservas de este mineral se eleva aún más (Méndez, 2011).

En el caso de Argentina, el crecimiento de la exportación ha sido del 23% anual como carbonato y 6% cloruro, siendo los principales destinos USA, China y Japón, con precio promedio de u\$ 5000/tn (Méndez, 2011) y expectativas de duplicarse en 10 años.

Si bien fue abortado recientemente, no puede dejar de mencionarse la importancia de un emprendimiento de generación de salmueras por inyección de agua con temperatura para producción de Potasio (Vale do Río Doce-Potasio Río Colorado), donde además la hidrogeología concurría en la prospección y evaluación de recursos hídricos subterráneos.



para la operación y la percepción del cavernamiento subterráneo por disolución (seudo-karst).

### Conclusiones

La producción minera a partir de salmueras experimenta un incremento notable en los últimos años, en especial la de Litio como carbonato o cloruro donde Argentina es el cuarto productor mundial, fundamentalmente a partir de yacimientos en la Puna.

La metodología para la evaluación y desarrollo de la minería de soluciones salinas subterráneas, es apreciablemente diferente a la clásica en yacimientos sólidos y se basa fundamentalmente en la hidrogeología.

Implica variabilidad en la ley minera, necesidad de una evaluación dinámica bajo régimen no-permanente, con fuerte participación de la determinación de los parámetros de flujo, reconocimiento de las anisotropías/heterogeneidades del medio y necesidad de una modelación matemática, con aptitud de pronóstico.

Distintos factores emergentes del mercado y de las nuevas tecnologías de aplicación, abren interesantes expectativas para el incremento de la actividad a corto plazo, y una excelente oportunidad para la disciplina geohidrológica, en estos aspectos con poca tradición.

### Referencias

- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K. and Godfrey, L. 2011. The Evaluation of brine prospects and the requirement for modifications to filling Standards. *Economic Geology*. Society of Economic Geologists Inc., Vol. 106:1225-1239.
- McCord, J. T., Ettiene, M., Emerson, D., Clark, J., Romero-Suarez, D. y Panday, S. 2011. Evaluación y producción de recursos de Litio salmuera en los salares de Argentina: perspectiva hidrogeológica e impacto de la heterogeneidad del acuífero. En : R.F. García y M. V. Rocha Fasolo (comp.) *Hidrogeología Regional y Exploración Hidrogeológica*, 268-275. Salta.
- Méndez, A. 2011. Complejo Minero: Litio. Informe especial. *Secretaría de Política Económica y Planificación del Desarrollo*. Mecon. Buenos Aires.
- Méndez, V., Turner, J. C., Navarini, A., Amengual, R. y Vieira, V. 1979. Geología de la región NO. Provincias de Jujuy y Salta. *Dir. General de Fabricaciones Militares*. Buenos Aires.
- Nicolli, H. B. 1980. Características geoquímicas generales de aguas y salmueras de la Puna argentina. *Academia Nacional de Ciencias*. Misceláneas N° 63. Córdoba.
- Nicolli, H. Méndez V. y Gómez, M. 1982. Salmueras ricas en metales alcalinos del salar del Hombre Muerto, Catamarca, Argentina. *5º Congreso Geológico Latinoamericano de Geología*, Actas, 3: 187-204. Buenos Aires.
- Schalamuk, I. B., Hernández, M. A., Ceci, J. H., Del Blanco, M. y Correa, M. J. 2005. Génesis e hidrodinámica de una salmuera subterránea rica en Sulfato de Sodio, Huyamampa, Santiago del Estero. *Actas del XVI Congreso Geológico Argentino*, III: 745-752. La Plata.